

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2013

Lukáš Tománek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Metody dimenzování baterií pro ostrovní provoz.

Battery Bank Sizing Methods for Off-Grid Mode.

2013

Lukáš Tománek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Tománek**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: Metody dimenzování baterií pro ostrovní provoz.
Battery Bank Sizing Methods for Off-Grid Mode.

Zásady pro vypracování:


1. Úvod
2. Typy akumulačních systémů
3. Popis typů akumulátorových baterií
4. Metody dimenzování akumulátorových baterií
5. Vyhodnocení metod dimenzování akumulátorových baterií

Seznam doporučené odborné literatury:


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Prokop, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2012
Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Lukášovi Prokopovi, Ph.D. za jeho ochotu při konzultacích, poskytnutí důležitých rad a materiálů potřebných pro vypracování této práce.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na ostrovní provozy a návrh akumulátorů pro tyto systémy. Izolované napájecí systémy pokrývají poptávku po elektrické energii výrobou elektřiny v blízkosti jejího využití. To je vnímáno jako možnost elektrifikace komunit, které se nacházejí v odlehlých oblastech, kde by bylo rozšíření sítě neekonomické. Baterie v ostrovních systémech jsou nutné z důvodu vyvážení nadbytku a poptávky energie v soustavě. Výsledkem je přehled různých metod pro dimenzování samostatných systémů.

Klíčová slova

Ostrovní systém, baterie, metody dimenzování, porovnání, uložení energie, samostatné hybridní systémy

Abstract

This paper is focused on off – grid systems and design batteries for these systems. Isolated power systems meet the electricity demand by generating power close to its point of utilisation. It is viewed as an option to electrify communities located in remote areas where extending the grid could be uneconomic. Batteries in stand – alone systems are necessary in order to balance demand and excess energy in the system. The result is an overview of different methods for the design of isolated systems.

Keywords

Standalone system, battery bank, sizing methods, comparison, storage energy, stand – alone hybrid systems

Seznam použitých symbolů a zkratk

AA-CAES	Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage
AC	Střídavý proud (alternating current)
Br – ZnBr	Zinko-bromidové baterie (zinc bromide battery)
Br/S	Polysulfidová Brómová baterie
CAES	Compressed air energy storage
CO ₂	Oxid uhličitý
DC	Stejnoseměrný proud (direct current)
DOD	Přípustná hloubka vybití baterie (depth of discharge)
FV	Fotovoltaický
H ₂	Vodík
I	Elektrický proud [A]
KOH	Hydroxid draselný
NaS	Sodíková baterie
O ₂	Kyslík
PVE	Přečerpávací vodní elektrárny
SCESS	Super Capacitor Energy Storage System
SMES	Superconducting magnetic energy storage
SOC	Stav nabití (State of Charge)
U	Elektrické napětí [V]
VA	Volt – ampérová
VRB	Elektrochemické oxidace a redukce vanadu
Li-ion	Lithium-iontové akumulátory
Li-pol	Lithium-polymerové akumulátory
LOLP	Pravděpodobnost ztráty zatížení (loss of load probability)
NaBr akumulátor	Sodno-bromidový akumulátor (sodium bromide battery)
NaS akumulátor	Sodno-sírný akumulátor (sodium sulfur battery)
NiCd akumulátor	Niklo-kadmiový akumulátor (nickel cadmium battery)

Seznam použitých obrázků

obr. 1-1 Prvky a jejich vzájemné vazby v hybridním systému.....	11
obr. 1-2 Denní průběh elektrické energie hybridního systému	12
obr. 2-1 Rozdělení akumulčních soustav.....	14
obr. 2-2 Rozdělení systémů podle nákladů na jednotku energie.....	15
obr. 2-3 Životnost a účinnost akumulčních systémů	15
obr. 2-4 Výkonové požadavky na akumulční soustavy	16
obr. 2-5 Ukázka moderního setrvačníku (Beacon Power)	18
obr. 2-6 Rozložení účinností v přečerpávací vodní elektrárně.....	19
obr. 2-7 Schéma akumulace prostřednictvím vodíku	20
obr. 2-8 Schéma akumulace a spolupráce OZE s elektrickou sítí	21
obr. 2-9 Principiální schéma.....	22
obr. 3-1 Princip průtokové baterie.....	24
obr. 3-2 Skutečně naměřená VA charakteristika malého olověného akumulátoru	27
obr. 3-3 Sodíková baterie	28
obr. 4-1 Postup dimenzování baterií	35

Seznam použitých tabulek

tab. 2-1 Rozdělení setrvačnicků podle specifických vlastností.....	17
tab. 3-1 Porovnání jednotlivých druhů průtokových baterií.....	26
tab. 3-2 Porovnání baterií	29
tab. 3-3 Porovnání baterií	30
tab. 3-4 Porovnání baterií	31

Obsah

1	Úvod	10
2	Typy akumulčních systémů	13
2.1	Rozdělení akumulčních systémů	13
2.2	Akumulční soustavy a jejich podrobnější popis	16
2.3	Elektrochemická přeměna – akumulace	17
2.4	Mechanické akumulční systémy	17
2.4.1	Kinetická energie	17
2.4.2	Potenciální energie	18
2.4.3	Tlaková energie	19
2.5	Chemická akumulace	19
2.5.1	Vodík	19
2.5.2	Biopaliva	21
2.5.3	Syntetické (syntézní) kapaliny a plyny	21
2.6	Tepelná akumulace	21
2.6.1	Metoda Ruths	21
2.6.2	Látky se změnou skupenství	22
2.6.3	Přírodní látky	22
2.7	Elektrická akumulace	22
2.7.1	Superconducting magnetic energy storage (SMES)	22
2.7.2	Superkapacitory	22
3	Popis typů akumulátorových baterií	24
3.1	Průtokové baterie	24
3.1.1	Elektrochemické oxidace a redukce vanadu – VRB	24
3.1.2	Ukládání pomocí halogenu Br – ZnBr	25
3.1.3	Polysulfidová Brómová baterie	25
3.2	ZEBRA Baterie	26
3.3	Olověné baterie	26
3.4	Baterie Sodium – Sulfur (NaS)	27

3.5	Lithiové baterie	28
3.6	NiCd akumulátory	29
3.7	Závěrečné hodnocení akumulátorových systémů	29
4	Metody dimenzování akumulátorových baterií	32
4.1	Intuitivní metody	32
4.2	Analytické metody	32
4.3	Numerické metody	35
5	Vyhodnocení metod dimenzování akumulátorových baterií	38
	Závěr	39
	Literatura	41

1 Úvod

Samostatné (ostrovní) systémy se vyznačují schopností elektrárenského bloku pracovat do izolované části vnější sítě, tzv. ostrova. Tento provoz charakterizují velké nároky na regulační schopnosti bloku. Tato schopnost je nezbytná pro předcházení a řešení stavu nouze. Jsou to velké změny kmitočtu a napětí v důsledku chodu v samostatné části soustavy. [2]

Příklady vytvoření ostrovních provozů:

- Rozhodnutí zákazníka (přednost obnovitelným zdrojům energie)
- Nízké náklady na provoz
- Nízká ekologická stopa
- Připojení k síti je nepravděpodobné v důsledku vysokých nákladů na vedení (zeměpisné umístění). Může jít o chatu, jachtu nebo obytný automobilový přívěs, kde získáme komfort elektrického osvětlení, chladničky a dalších spotřebičů.

U připojených spotřebičů se pak klade důraz na nízkou spotřebu energie – čím menší spotřeba, tím menší a levnější je i systém. Příkladem jsou fotovoltaikou napájená veřejná osvětlení, nouzové telefonní budky u dálnic, výstražná dopravní signalizace nebo parkovací automaty. Takovéto zařízení jsou zcela mobilní, bez nutnosti výkopu pro napojení k síti. Nárůst poptávky pro využití ostrovních systémů je důsledek rozmachu obnovitelných zdrojů energie vhodných pro ostrovní režim.

Vhodné zdroje pro využití v ostrovním režimu elektrického napájení jsou následující:

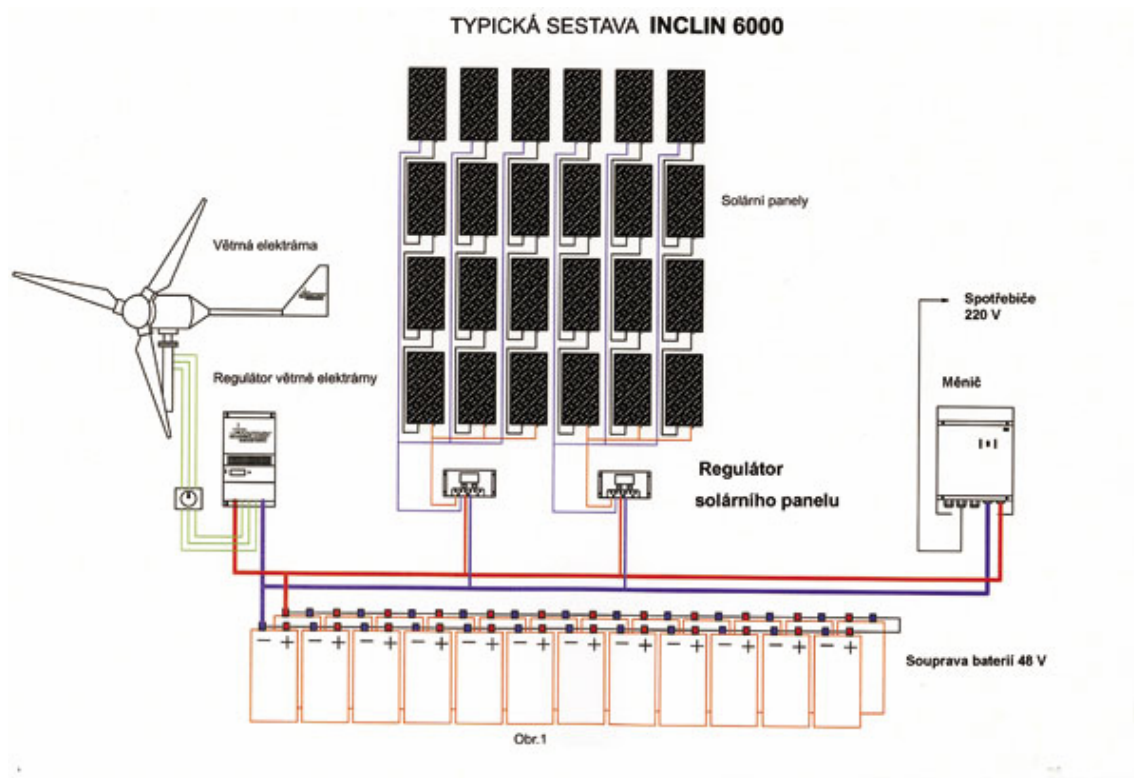
- Větrné elektrárny
- Fotovoltaické systémy
- Dieselgenerátory
- Malé vodní elektrárny
- Bio-plynové generátory
- Palivové články

Volba napájecího zdroje záleží na geografické a meteorologické situaci daného území. Při použití sestavy více metod mluvíme o tzv. hybridní jednotce. Hojným hybridním celkem je seskupení větrné a solární elektrárny, jehož princip je znázorněn na obr. 1-1 [1]. Sloučení větru a fotovoltaického systému nám přináší výhody v podobě vzájemného doplňování. Ve dne, kdy je sluneční záření silné, je vítr slabý. Při západu slunce je sluneční záření slabé, ale vítr zesílí vlivem větších teplotních rozdílů na povrchu země. V létě je sluneční záření silné a vítr slabý, v zimě je pak sluneční záření slabé a vítr silnější. Vzájemná vazba mezi solární energií záření a energií větru vytváří z hlediska časové sekvence nejlepší podmínky pro kombinaci. Kupříkladu kdybychom použili pouze solární jednotku, musela by být natolik velká, aby zajistila dodávky i

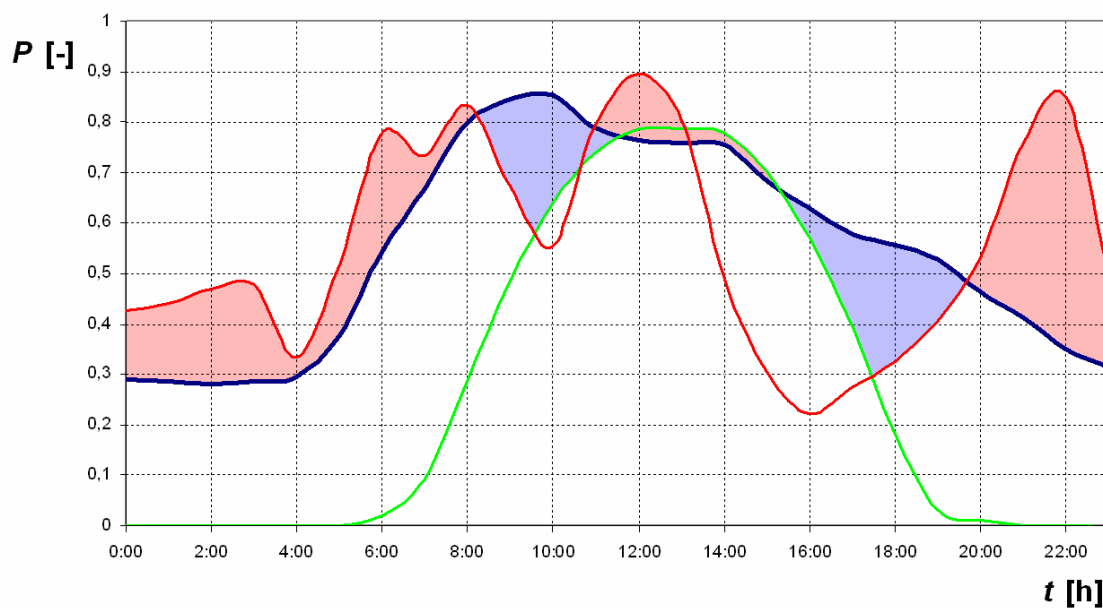
přes zimní pokles účinnosti slunečního kolektoru, zatímco v kombinaci s větrnou elektrárnou vylučuje potřebu nadměrného předdimenzování fotovoltaické části.

Společnou nevýhodou větrné a fotovoltaické soustavy je časová neurčitost elektrického výkonu zdroje, která vede k nerovnováze mezi výrobou elektrické energie a požadavky spotřebičů v daném časovém okamžiku. Hybridní systém tuto proměnlivost do jisté míry kompenzuje, jak naznačuje obr. 1-2 [15], nicméně je nutné do soustavy zařadit zásobník elektrické energie. Jeho kapacita má povinnost zabezpečit po určitou dobu autonomní provoz v době, kdy hybridní zdroj žádnou elektrickou energii nedodává.

Systémy nezávislé na rozvodné síti obvykle používají mikroelektrárny s výkonem od 0,1 do 5 kW. Součástí ostrovního systému jsou akumulátory a řídicí elektronika. V objektu pak může být buď rozvod stejnosměrného proudu s nízkým napětím, nebo je v systému zapojen ještě střídač pro dodávku střídavého proudu. [3], [4], [5]



obr. 1-1 Prvky a jejich vzájemné vazby v hybridním systému



obr. 1-2 Denní průběh elektrické energie hybridního systému

Normalizovaný typový diagram dodávek elektřiny

Denní průběh energie fotovoltaické elektrárny

Denní průběh energie větrné elektrárny

Z výše uvedených průběhů výroby a spotřeby energie v průběhu dne je zcela jasné, že je nezbytně nutné energii akumulovat pro vyvážení nadbytku a poptávky v soustavě. Problematikou ukládání elektrické energie se zabýváme v následující kapitole.

2 Typy akumulčních systémů

Akumulací elektrické energie je myšleno hromadění, zálohování nebo uchování energie pro její pozdější využití ve vhodné kvalitě a kvantitě. V současnosti je nejvíce diskutována v souvislosti s řešením odstranění nespojitosti energie z obnovitelných zdrojů.

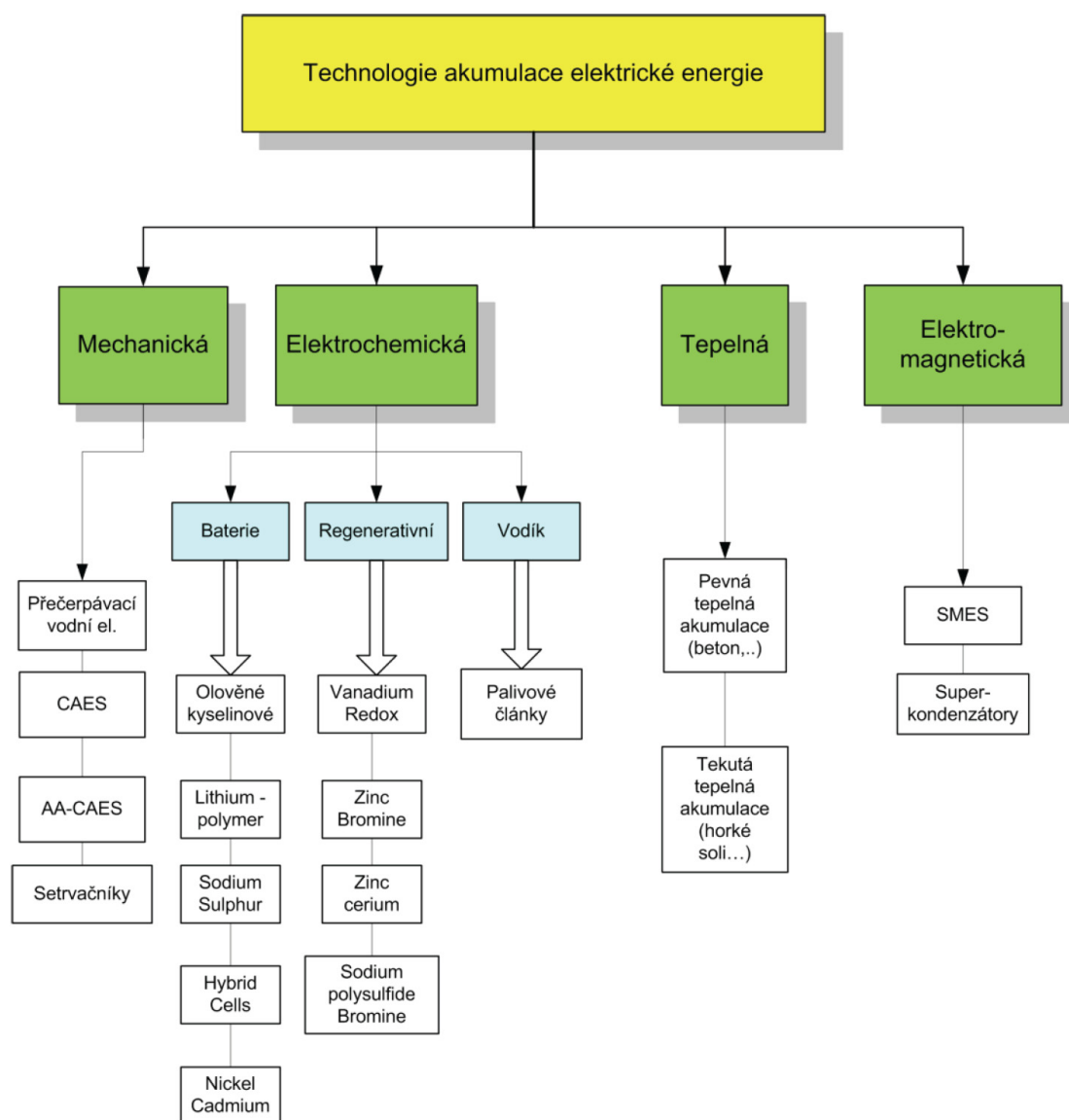
Akumulační systémy jsou z hlediska výroby a spotřeby elektrické energie nezastupitelné a jsou v současné době stále ve vývoji. Přesto umíme elektřinu s poměrně dobrou účinností skladovat.

2.1 Rozdělení akumulčních systémů

Akumulační soustavy můžeme rozdělit podle:

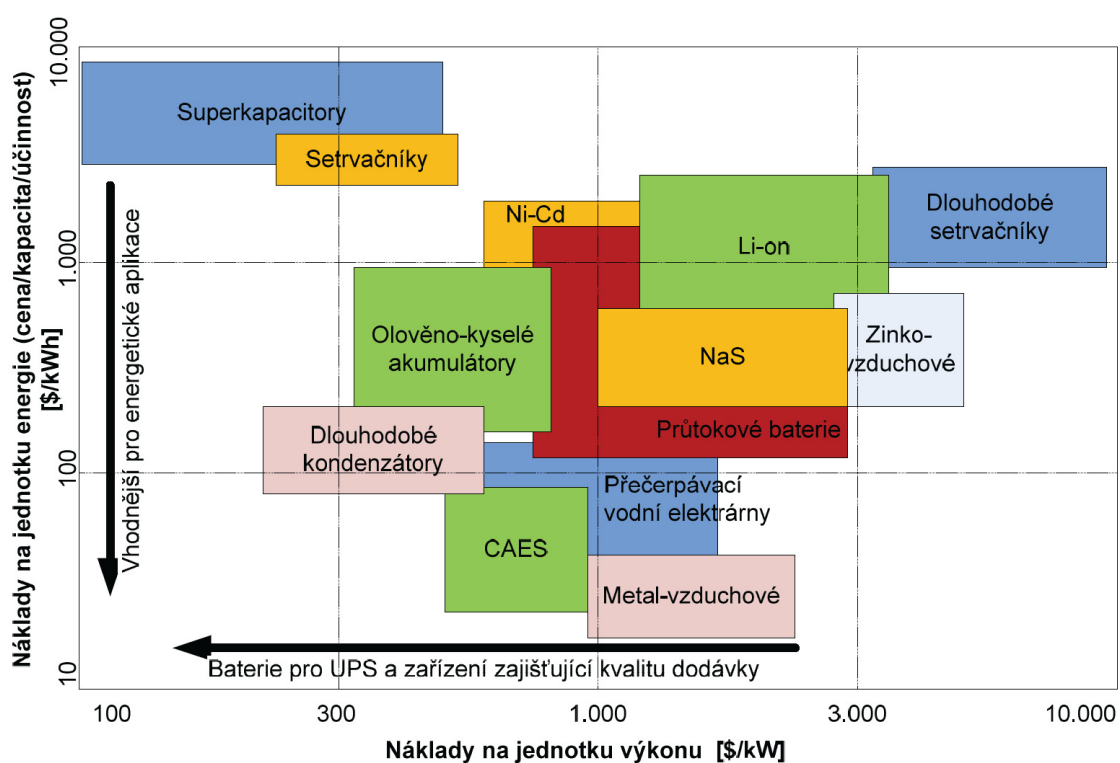
- a) Požadovaného výkonu
 - Okamžitý
 - Záložní
- b) Akumulační kapacity
 - Malá
 - Střední
 - Velká
- c) Fáze přeměny při akumulaci
 - Homogenní
 - Heterogenní
- d) Počtu cyklů
 - Denní
 - Týdenní
 - Celoroční
 - Nepravidelná
- e) Formy ukládání energie
 - Přímou
 - Nepřímou
- f) Rychlosti a reakční rychlosti u nabíjení a vybíjení
 - Pomalá
 - Rychlá

Akumulační soustavy můžeme členit na primární a sekundární. Primární mohou dodávat energii okamžitě, sekundární až po polarizaci elektrod (prvotně se musí nabít). Na obr. 2-1 je blokový diagram technologického rozdělení [6].

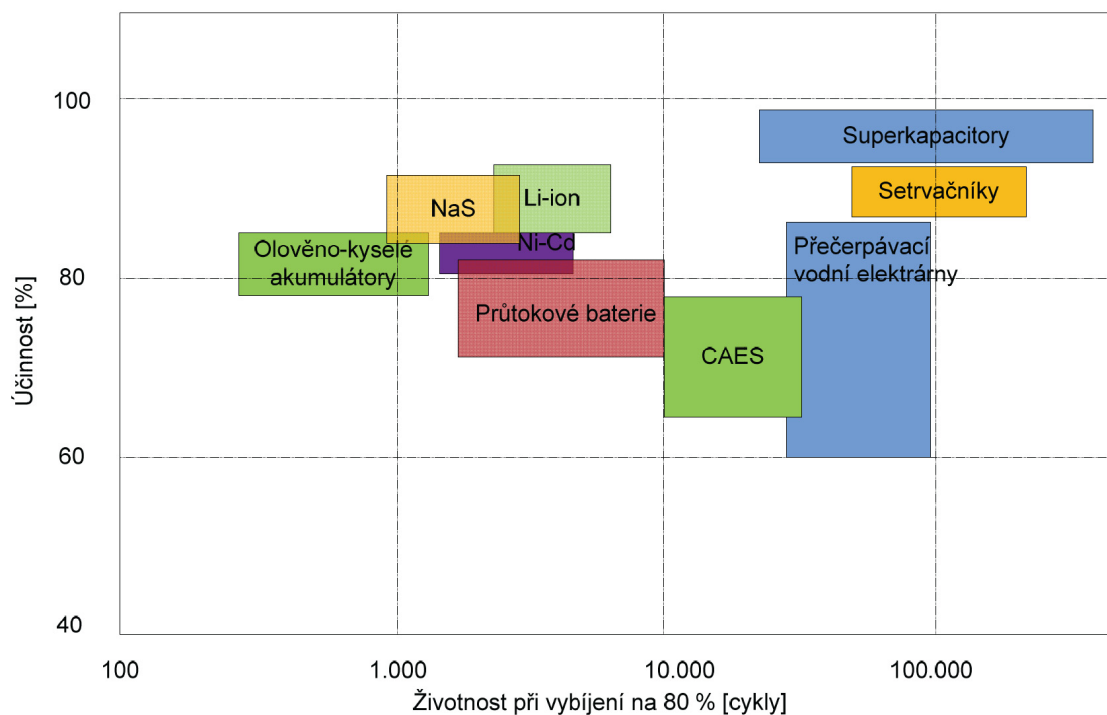


obr. 2-1 Rozdělení akumulčních soustav

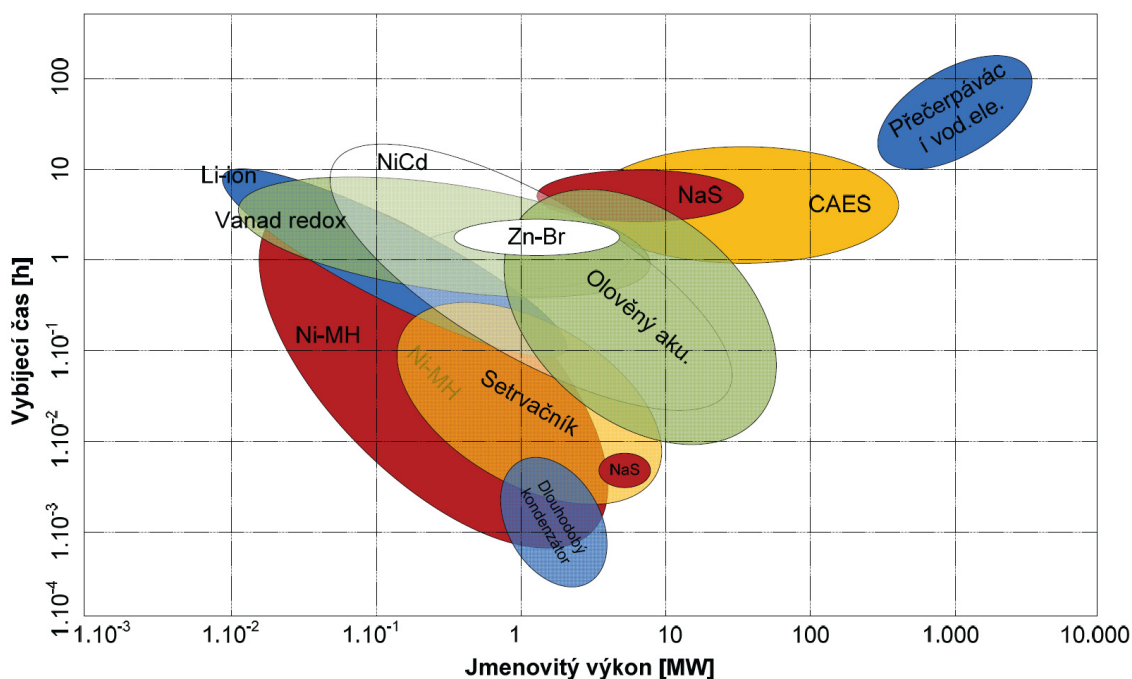
Na obr. 2-3 až obr. 2-4 [7] je znázorněno rozdělení akumulčních systémů z hlediska ekonomického, popřípadě z požadavků aplikace na konkrétní soustavu.



obr. 2-2 Rozdělení systémů podle nákladů na jednotku energie



obr. 2-3 Životnost a účinnost akumulčních systémů



obr. 2-4 Výkonové požadavky na akumulční soustavy

2.2 Akumulační soustavy a jejich podrobnější popis

Požadovaný výkon

Požadovaný výkon a schopnost jej rychle poskytnout záleží na aktuálním rozložení spotřeby a výroby elektrické energie při náhlých výpadcích velkých zdrojů.

Okamžitý záložní výkon nastává, když je potřeba elektrická rezerva do 5 minut. Vhodnými adepty jsou setrvačnické nebo kondenzátorové baterie pro menší výkony (desítky kW), nebo přecherčpávací vodní elektrárny pro větší výkony (desítky až stovky MW). Rychlé, popřípadě pomalejší zálohy (5 až 30 minutami a nad 30 minut) zajišťují složitější baterie. Pro pomalé rezervy se využívá elektráren na zemní plyn a studených záloh. [14]

Akumulační kapacita

Tato akumulční schopnost neboli jímavost akumulátoru se udává jako náboj v ampérhodinách nebo watthodinách. Je to doslova schopnost (vlastnost) daného uspořádání nahromadit v sobě elektrické náboje. [14]

Počet cyklů

Je to pojem, který zmiňujeme v souvislosti s dlouhodobou akumulací, kde se předpokládá časté střídání režimů. Naopak pro akumulaci záložní (tzv. zálohové akumulátorovny v jaderných elektrárnách), je počet nabíjecích vybijecích cyklů zásadní. Rovněž je kladen důraz na dostatečný výkon v relativně krátkém okamžiku a zvláště spolehlivost. [14]

Reakční rychlost a rychlost u nabíjení a vybíjení

Reakční rychlost je schopnost přizpůsobení aktuálním nárokům kladených na akumulátory. Rychlost změny nabíjení a vybíjení je významná pro těžko předvídatelné obnovitelné zdroje energie. Tato rychlost se pohybuje od řádů desetin milisekund až po desítky minut.

Rychlost nabíjení nebo vybíjení je schopnost dosáhnout plné kapacity nabití (vybití) během určitého časového úseku. [14]

Fáze přeměny

Homogenní systémy:

Soustava, kde je podoba ukládání a odběr energie řešena shodným principem přeměny energie. V případě elektrické energie jde o uskladnění ve formě magnetického nebo elektrostatického pole.

Heterogenní systémy:

Systém, kde je podoba ukládání a odběr energie řešen odlišným (i částečným) principem přeměny energie. Na tomto principu stojí všechny ostatní druhy akumulčních systémů (chemické vazby, mechanické, tepelné aj.). [14]

2.3 Elektrochemická přeměna – akumulace

Mezi elektrochemické akumulátory patří zejména průtokové baterie, palivové články a akumulátory. Více o palivových článcích se lze dočíst v kapitole Vodík. Je však třeba dodat, že palivový článek může pracovat i na metanol, popřípadě na methan. Více k této problematice nalezneme v samostatné kapitole Popis typů akumulátorových baterií. [14]

2.4 Mechanické akumulční systémy

2.4.1 Kinetická energie

Setrvačníky (Flywheel)

Setrvačníky jsou především jednoduché a vhodné pro různé aplikace. V současnosti jsou zcela schopné dosáhnout rychlosti 20.000 min^{-1} (i přes 50.000 min^{-1}). Rotor se otáčí za sníženého tlaku okolního média blížícího se vakuu s použitím magnetických ložisek, což má za následek značnou účinnost (přes 90%). Životnost se pohybuje řádově v 10^5 cyklů, lépe řečeno několik let. Údržba se týká pouze kontroly chladiva, vakua, popřípadě ložisek. Na obr. 2-5 můžeme vidět zástupce moderního setrvačníku společnosti Beacon Power a tab. 2-1 nám znázorňuje druhy setrvačnicků. [8]

Kompaktní kovové	Uhlíkové kompozitní	Power ring	Uhlíková vlákna
Pomaloběžné		Rychloběžné	
Klasická ložiska	Magnetická ložiska		Supravodivá ložiska

tab. 2-1 Rozdělení setrvačnicků podle specifických vlastností



obr. 2-5 Ukázka moderního setrvačnicku (Beacon Power)

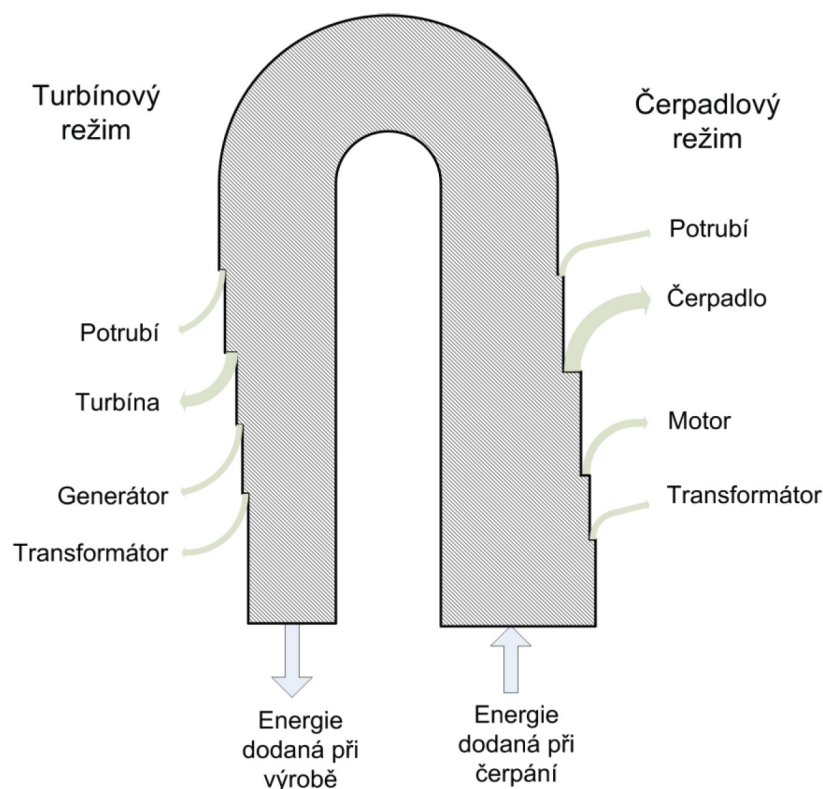
2.4.2 Potenciální energie

Přečerpávací vodní elektrárny (PVE)

V čase přebytku energie pumpují vodu z níže umístěné nádrže do horní, aby při nedostatku vypustily vodu přes turbíny nazpátek. Jejich budování je nákladné, zeměpisně náročné a jsou nevhodné jako záskokový zdroj pro okamžité potřeby. Disponují však značným rozsahem regulace

Doba přechodu z čerpadlového do turbínového provozu se udává do 5 minut u starších typů (čerpadlo-turbína v jednom) a do 1 minuty u moderních strojů.

Efektivita PVE dosahuje 50 – 70%. Novější bloky (strojové vybavení) obvykle 80%. Názorné rozložení účinností můžeme vidět na obr. 2-6. [14]



obr. 2-6 Rozložení účinností v přečerpávací vodní elektrárně

PVE fungují ve čtyřech základních režimech:

- klidový provoz
- turbínový provoz
- čerpadlový provoz
- kompenzační provoz

2.4.3 Tlaková energie

CAES (Compressed Air Energy Storage) je akumulace energie pomocí stlačeného vzduchu. Společně s vylepšenou verzí AA-CAES (Adiabatic Advanced - Compressed Air Energy Storage) nejsou příliš rozšířeny. Tento typ skladování energie dosahuje mezi 60 – 75 %. [14]

2.5 Chemická akumulace

2.5.1 Vodík

Palivový článek založený na vodíko-kyslíkové konverzi

Tento systém je často skloňován ve vzájemném vztahu s budoucí dopravou a energetikou. Je třeba na začátek připomenout, že vodík není palivem, ale výhradně nosičem energie. Účinnost

zpětné přeměny na elektřinu se však pohybuje kolem 30% a navíc je v současnosti vodíkové hospodářství stále problematické. [14]

Výroba vodíku

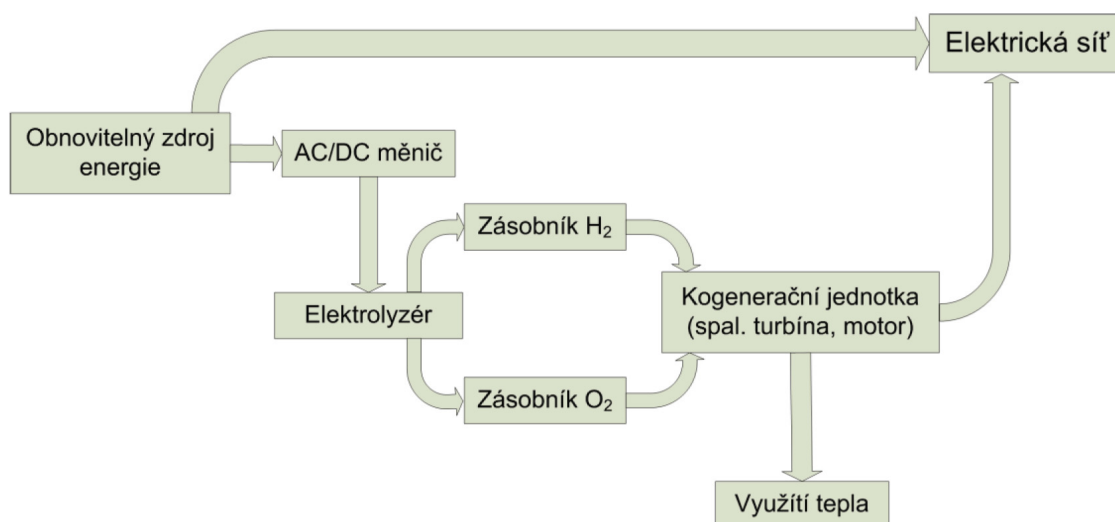
Vodík produkujeme zpravidla elektrolýzou, což je děj, ve kterém se vodík uvolňuje na katodě a na kyslík na anodě. Tento proces je náročný na čistotu vody a spotřebu elektřiny, proto se pro zesílení vodivosti vody používá roztoku KOH. [14]

Problémy v akumulaci vodíku

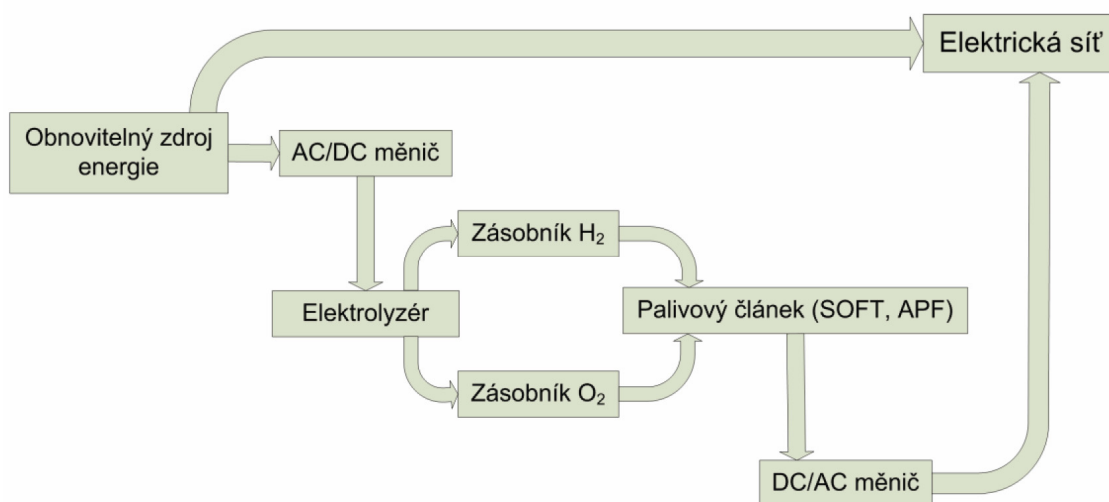
Jelikož je uchovávání vodíku ve velkých objemech stále problematické (vodíkové atomy jsou obzvlášť lehké a malé a unikají skrze krystalové mřížky různých kovů nebo jejich slitin), skladujeme jej ve třech fázích: jako plyn, kapalinu nebo pomocí metal-hydridových zásobníků, kdy se plyn naváže na krystalovou strukturu slitiny. [14]

Výhody a nevýhody systému

Systém obsahuje minimální počet pohyblivých součástí, je bezemisní, nehlučný (vyjma kompresorů), avšak palivové články jsou příliš závislé na čistotě vstupujících médií. Na obr. 2-7 a obr. 2-8 vidíme základní systém akumulace elektrické energie prostřednictvím vodíku. [14]



obr. 2-7 Schéma akumulace prostřednictvím vodíku



obr. 2-8 Schéma akumulace a spolupráce OZE s elektrickou sítí

2.5.2 Biopaliva

Jde o cíleně pěstované rostliny využitelné pro energetiku, kdy můžeme udržovat vhodné klima skleníků pro potřebný rozvoj rostlinstva. Nezbytné je však zabezpečit fotosyntézu.

Následné využití (většinou termické zpracování) je chápáno jako jistý způsob zachování energie. [14]

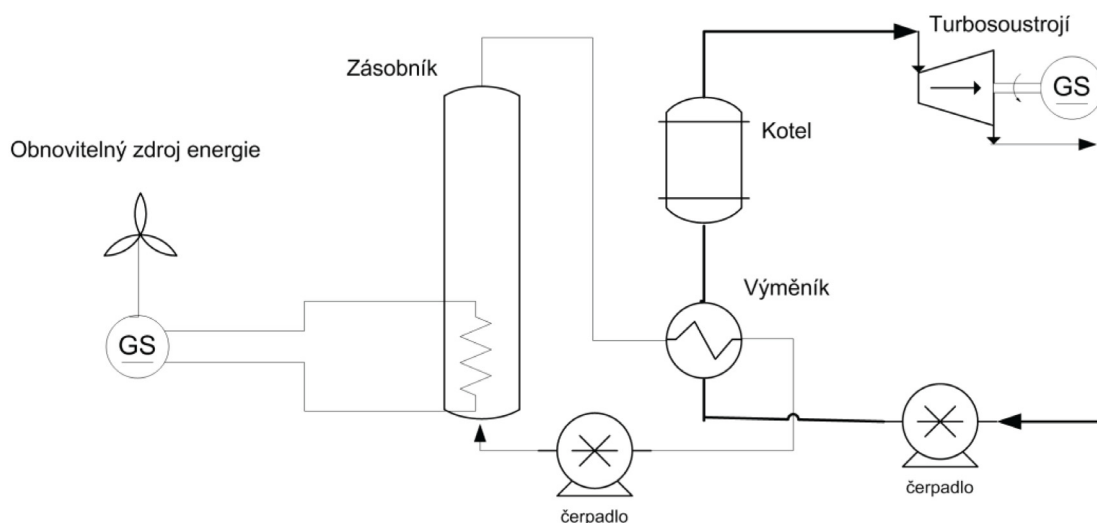
2.5.3 Syntetické (syntézní) kapaliny a plyny

Syntézním plynům je přikládán velký důraz. S použitím elektrické energie je možno z CO_2 a vody vyrobit metanol. Jinou možností produkce syntetických plynů je zejména parní reforming uhlí. [14]

2.6 Tepelná akumulace

2.6.1 Metoda Ruths

Tento postup stojí na termální akumulaci elektrické energie prostřednictvím teplé vody, která je následně přes regenerační oběh kondenzované vody z turbíny zpět použita. Vyznačuje se vysokou mírou efektivity a akumulací kapacity. Princip této technologie je vyobrazen na obr. 2-9. [9]



obr. 2-9 Principiální schéma

2.6.2 Látky se změnou skupenství

Jsou vhodným tepelným akumulátorem jen v rozsahu jich vlastních teplot tání a při akumulaci teploty vyšší než je jejich bod tání, vyplatí se akumulace do současných materiálů. Příhodné jsou různé parafíny a vosky, protože jejich teploty tání jsou blízké teplotě varu vody. Eutektické slitiny mají tu specifickou vlastnost, že při tuhnutí vytvářejí krystaly. Z elektroenergetického hlediska tyto materiály však nemají velký význam. [14]

2.6.3 Přírodní látky

Mezi tyto látky patří kupříkladu kámen, cihla a nepochybně voda. k umělým materiálům můžeme zařadit beton. [14]

2.7 Elektrická akumulace

Elektrická akumulace je z hlediska elektroenergetiky nejlepším řešením, ovšem dnes stále omezená. [14]

2.7.1 Superconducting magnetic energy storage (SMES)

Tato soustava hromadí energii do magnetického pole. Jde o relativně nový systém fungující v malém měřítku a jeho velkou překážkou je akumulace vyššího množství energie (nad 1MWh). [10]

2.7.2 Superkapacitory

Superkondenzátory reprezentují nový velkoobjemový typ uchovávání energie. Kondenzátory disponují velkou hustotou energie, řádově 10 Wh/kg, delší životností oproti tradičním bateriím a také vyšší účinností až 95%. Podstatnou výhodou jsou především vysoké chvilkové dodávky

výkonu, kdy můžeme dosáhnout proudu až 4500 A a extrémně krátká doba nabíjení a vybíjení. SCESS (Super Capacitor Energy Storage System) zvládá několik milionů cyklů nabití a vybití. [11]

Hlavním cílem vývoje superakapacitoru je vznik vhodných zásobáren s kapacitou baterií a zároveň s operativními vlastnostmi kondenzátorů. Jejich uplatnění spočívá v použití pro zařízení s větším počtem nabíjecích a vybíjecích cyklů než dovolují baterie. Specifická hustota energie je $1,6 \text{ kWh.kg}^{-1}$ a je vyšší než u baterií (kromě Li-ionových baterií). Napětí superkapacitorové buňky nepřekračuje 2,3 V.

Mezi jejich největší výhody patří:

- Nízký vnitřní odpor zapříčiňující vysokou účinnost a velice malé ztráty
- Značná efektivita nabíjení
- Vysoká četnost nabíjení a vybíjení (mnoho cyklů)

Nevýhody:

- Menší množství uchované energie na jednotku váhy oproti elektrochemickým článkům (superkondenzátory s $3\text{-}5 \text{ Wh.kg}^{-1}$ vůči tradičním bateriím s $30\text{-}40 \text{ Wh.kg}^{-1}$)
- V souvislosti na množství uložené energie se mění napětí
- Mají nejvyšší dielektrickou absorpci ze všech typů [14]

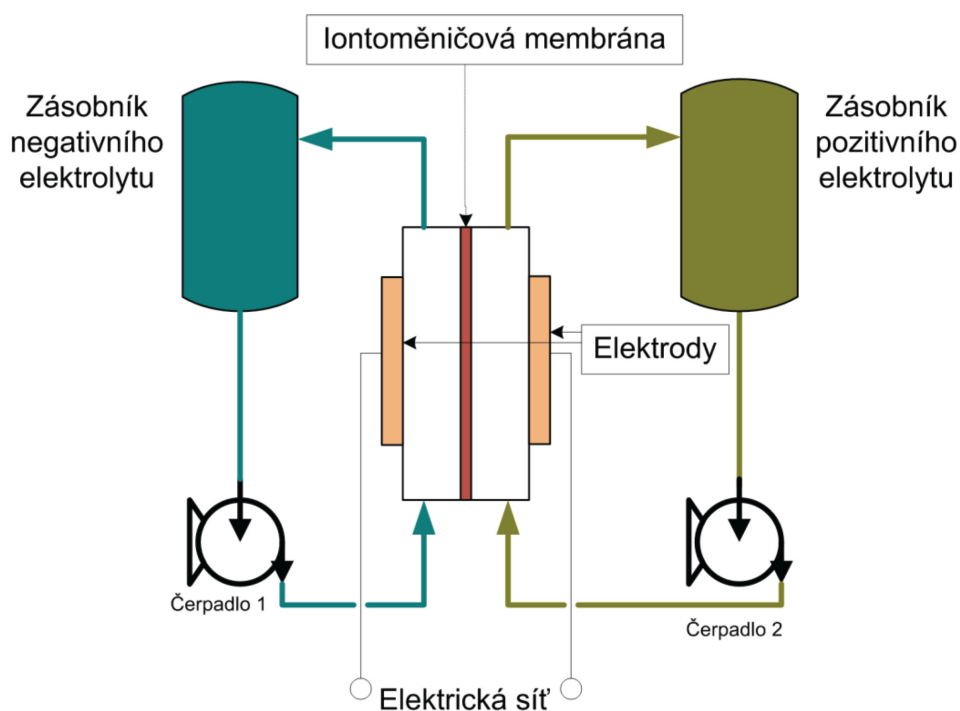
3 Popis typů akumulátorových baterií

3.1 Průtokové baterie

Nabíjení probíhá obdobně jako u běžné baterie s tím rozdílem, že se energie ukládá prostřednictvím tekutého elektrolytu. Ten je čerpadly vháněn do zásobníků, ze kterých je následně přiváděn zpět do chemického článku. Schéma průtokové baterie je na obr. 3-1. [14]

Typy průtokových baterií běžících na principech:

- Elektrochemické oxidace a redukce vanadu – VRB
- Uskladnění pomocí halogenu Br – ZnBr
- Na roztoku Polysulfid Bromidu (PSB, Br/S)
- CeZn (cér/zinek) – zatím ve vývoji



obr. 3-1 Princip průtokové baterie

3.1.1 Elektrochemické oxidace a redukce vanadu – VRB

Oxidace a redukce se nazývá redoxovým systémem. Největší výhoda technologie tkví v neomezeném množství cyklů nabití a vybití, kdy nedochází k degradaci elektrolytu. Také nedochází k velkému samovybití.

Zásadním problémem je však těsnost systému (ucpávky, čerpadla). Jediný oddělující činitel mezi dvěma elektrolyty je iontoměničová (iontovo - propustná polymerní) membrána s životností přes 15000 period.

Množství elektrolytu v zásobnících udává kapacitu baterie. Objemová energetická hustota elektrolytu úplného nabíjecího (vybíjecího) cyklu je 15 až 25 kWh.m⁻³. Měrná hmotnost VRB článku dosahuje u větších zařízení 6,5 až 10 kg.kW⁻¹ a u menších výkonů do 12,5 kg.kW⁻¹. Váha elektrolytu tvoří zhruba 90% hmotnosti celku, kde měrná hustota elektrolytu je přibližně 1,4.

Z hlediska zastavěné plochy, VRB umožňuje díky oddělenému uchovávání elektrolytu snadné přizpůsobení prostorovým okolnostem (85 až 90% zastavěného prostoru zabírají zásobníky).

Reverzibilita je zásadní předností VRB. V jednom elektrochemickém měniči tak probíhá nabíjení i vybíjení obdobně jako u obvyklých typů akumulátorů. Rovnovážné napětí plně nabitého článku při provozní teplotě 25°C je 1,35 V. Podle stupně nabití se napětí změnou složení obou elektrolytů postupně mění, až u zcela vybitého článku klesne na 1,0 V.

Změna režimu nabíjení na vybíjení nastává takřka ihned (milisekundy) ve vazbě s polaritou difference okamžitého rovnovážného napětí a napětí připojeného vnějšího elektrického obvodu. Tento princip je pro svou vhodnost do celoročního provozu s minimální údržbou obzvláště výhodný pro akumulaci energie z obnovitelných zdrojů. [14]

3.1.2 Uskladnění pomocí halogenu Br – ZnBr

Zinko-bromidové baterie obsahují zinkovou zápornou elektrodu a brómovou kladnou elektrodu od sebe vzájemně separované pomocí mikropropustné membrány. Roztok zinku a soubor brómové sloučeniny obíhají ve dvou oddílech. Tento typ akumulátoru pracuje částečně na jiném principu než PSB a VRB. V ZnBr mají elektrody úlohu substrátu pro reakci a jejich kapacita se může omezit neúplným vybitím. Při nabíjení je zinek elektricky pokoven na anodu a bróm se váže na katodu. [14]

3.1.3 Polysulfidová Brómová baterie

Jako elektrolyt jsou zde aplikovány roztoky bromidu sodného (NaBr), sodíku (Na) a polysulfidu (Sn²⁻). Kladné ionty sodíku probíhají membránou během nabíjení nebo vybíjení. Výsledný bróm a síra emitují a přijímají elektrony. Z tohoto důvodu se tento systém označuje Br/S. [14]

Srovnání průtokových baterií poskytuje tab. 3-1 [6].

	VRB	Bromid zinku	PSB - Br/S
Jmenovitý výkon [MV]	<3	<1	<15
Jmenovitá kapacita [MVh]	0,005 - 5	0,01 - 5	0 - 120
Energetická hustota [MV/l]	16 - 33	60 - 90	20 - 30
Životnost [roky]	5 - 10	5 - 10	15
Počet cyklů	>12000	>2000	--

tab. 3-1 Porovnání jednotlivých druhů průtokových baterií

3.2 ZEBRA Baterie

Tento druh akumulátoru je složen z NaNiCl , tedy sodíku, niklu a chloru. Disponuje vyšší energetickou hustotou (např. než u NiCd) a 2500 cykly. Jeho stavba je blízká baterii NaS . Rovněž pracuje při značných teplotách. [14]

3.3 Olověné baterie

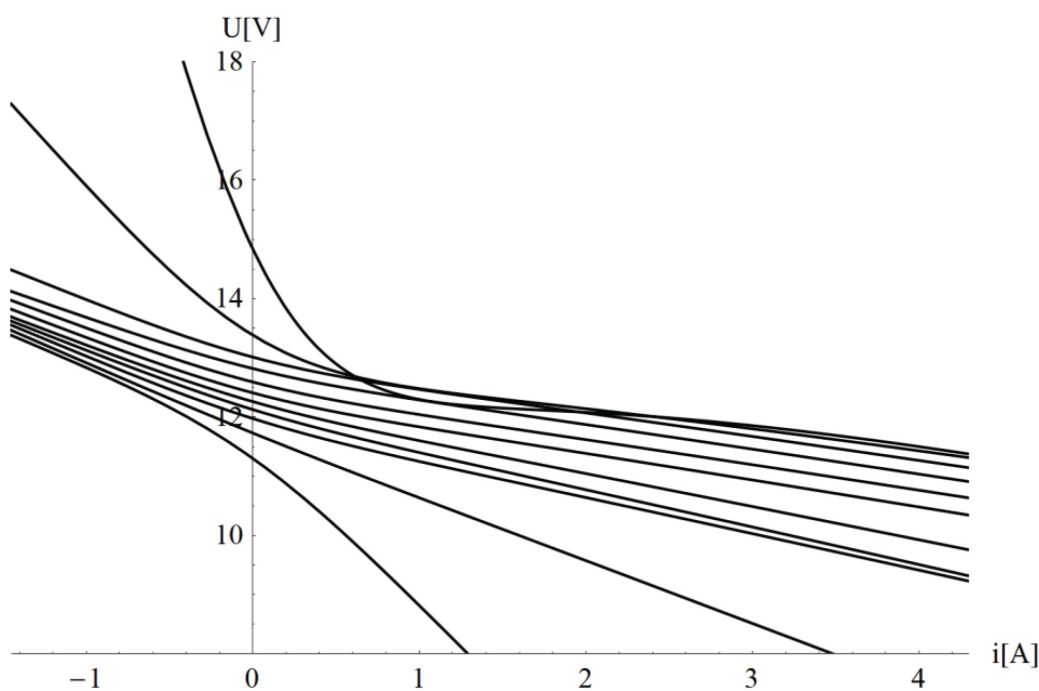
Tato známá baterie zahrnuje více než 45% celosvětově produkce baterií. Tvoří ji nádoba s dvěma elektrodami z čistého olova a vodný roztok kyseliny sírové o hustotě 1,2 až 1,3 (dle typu). Pozitivní elektrody mají podobu mříží, které se plní pastou nebo jsou žebrované. Negativní elektrody jsou rovněž mřížkované a pastované. Jedna deska je vyplněna oxidem olovičitým (hnědá), druhá houbovým olovem (šedá). Ty se střídavě řadí do celých soustav desek, kde jsou umístěny blízko sebe a shodné desky propojeny.

Při vybíjení se tvoří voda a z toho důvodu se snižuje koncentrace kyseliny sírové. Naopak koncentrace zpětně stoupá při nabíjení. Díky tomuto jevu jsme schopni sledovat úroveň nabití hustotou kyseliny. Když v nabíjení pokračujeme i po nabití, dochází na olověné elektrodě k vytváření vodíku a na desce s oxidem vzniká kyslík. Při dlouhodobém přebíjení se difusí nestačí doplňovat kyselina sírová okolo pozitivních elektrod, což v důsledku způsobí rychlejší pokles napětí při vybíjení. [12]

Jmenovité napětí článku je 2 V, kde maximální napětí nabitého článku dosahuje 2,125 V. Vybitý článek má hodnotu 1,75 V a při naprostém vybití spadne až k 1,0 V (zvláště za nízkých teplot). Reálnou VA charakteristiku nalezneme na obr. 3-2.

Největším handicapem těchto akumulátorů je nízká hustota energie, velká hmotnost a dlouhá doba nabíjení.

Do moderních verzí již není třeba dolévat vodu a jsou tedy zpravidla bezúdržbové. Vylučovaný kyslík a vodík se zpět rekombinuje na vodu a pomocí ochran proti vznikajícím plynům při přebíjení, zamezuje eventuální nadlimitní tvorbě plynů jejich odpouštěním (tzv. baterie ventilové nebo baterie řízené ventilem). Dále se používá gelového elektrolytu, což je směs kyseliny sírové s malými částicemi skelného prachu. Gelové baterie jsou bezpečnější a pohodlnější pro obsluhu a údržbu. [14]



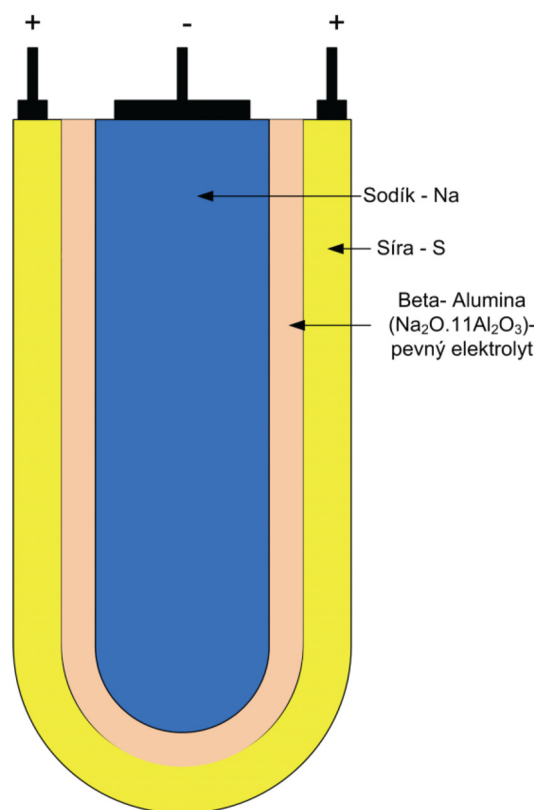
obr. 3-2 Skutečně naměřená VA charakteristika malého olověného akumulátoru

3.4 Baterie Sodium – Sulfur (NaS)

Jde o akumulátor využívající spojení sodíku a síry. Každý článek akumulátoru vytváří napětí kolem 2 V. Velké moduly jsou řešeny jako schránka vyplněna argonem nebo vakuem kvůli omezení tepelných ztrát. Sodík je značně reaktivní a s ostatními alkalickými kovy (lithium, draslík) dosahují velké hustoty energie na jednotku hmotnosti.

Tento akumulátor dosahuje až 400 Wh.kg^{-1} , což je více než jedenáctinásobek olověné baterie. Jejich prostorová náročnost je třikrát menší v porovnání s olověnou baterií. Zvládají chvilkové přetížení a jsou tedy vhodné pro špičkové odběry (šesti násobek normalizovaného výkonu po dobu minimálně 30 sekund). Rychle se dobíjejí, samovolně se nevybíjejí, účinnost se pohybuje mezi 80% až 90%, doba životnosti přesahuje 15 let, netrpí paměťovým efektem, jsou zhotoveny z laciných surovin a jsou především určeny pro stálý chod nabíjení/vybíjení. Jako nevýhoda tohoto akumulátoru se jeví neschopnost přemístění nebo činnost s vibracemi kvůli vnitřním roztaveným složkám, které musejí během provozu zůstat v klidu.

Z daných parametrů je jasné, že jde o jeden z nejvhodnějších nyní vyráběných akumulčních systémů. [13]



obr. 3-3 Sodíková baterie

Články jsou uzavřeny do hermetických tlakově a tepelně odolných pouzder. Jako katoda je použita roztavená síra (teplota tání cca 120°C) a anoda roztavený sodík (teplota tání cca 80°C). Pro největší účinnost a výkon se článek udržuje při 300°C až 350°C. Elektrolyt je tvořen jako pevná struktura z keramiky, obohacena hliníkem a oxidem hlinitým. Na obr. 3-3 [14] je zobrazena struktura sodíkového článku. [13]

3.5 Lithiové baterie

U běžných článků je anoda z porézního uhlíku, katoda z oxidu lithia a jiného kovu (LiNiO_2 , LiCoO_2 nebo LiMoO_2) a elektrolytem je lithiová sůl v organických rozpouštědlech.

V budoucnu se budou lithiové akumulátory ubírat směrem levnějších technologií za cenu snížené kapacity (LiFePo , Li-air). Uplatní se však pouze v bezvýpadkových záložních zařízeních – Uninterruptible Power Supply (UPS). [14]

Pro koncept akumulčních jednotek se hodí běžné typy Li-ion a Li-pol. Upřednostňují se pro svou malou váhu, takřka bezztrátovou účinností nabíjení, bezúdržbový provoz, dlouhou životnost (až 3000 cyklů), rychlost nabíjení a vybíjení a oproti předchozím typům u nich možné uložit větší množství energie na jednotku obsahu. Samovybíjení je téměř vyřešeno a články je možné skoro úplně vybit bez ztráty. Velkou překážkou zůstává astronomická pořizovací cena. [13]

Napětí jednotlivých článků akumulátoru Li-ion je okolo 3 V a u Li-pol mezi 1,8 a 3,3 V. [13]

3.6 NiCd akumulátory

Články jsou tvořeny niklovou katodou, kadmiovou (dříve železnou) anodou, vrstvou elektrolytu se separátorem, vratným pohlcovačem vlhkosti a hermetickým kovovým nebo plastovým pouzdrem. Elektrolyt je obvykle jednoduchý hydroxid alkalického prvku, zpravidla hydroxidem draselným KOH nebo hydroxidem sodným NaOH.

Při přebíjení se vylučuje velké množství vody do elektrolytu, což má za následek zničení pohlcovače vlhkosti nebo snížení životnosti. [13]

3.7 Závěrečné hodnocení akumulátorových systémů

Výsledné shrnutí akumulátorových systémů se nachází v tab. 3-2, tab. 3-3, tab. 3-4 [14].

Technologie	Počet cyklů	Konfigurace	Specifická energie [Wh.kg ⁻¹]	Energetická hustota [Wh.l ⁻¹]	Specifický výkon [W.kg ⁻¹]
Oloveno - kyselinové	800	článek	35	80	200
Nikl - kadmiové	1000	článek	35	80	260
Nikl - metalhydrid	900	článek	65	220	850
Nikl - železo	1000	článek	30	60	100
Nikl - vodík	2000	článek	55	60	100
Zinek/oxid stříbra	40 - 50	článek	90	180	500
Zinek/bromid	1250	baterie	65	60	90
Zinek vzduch	--	baterie	150	160	95
Regenesys (PSB, Zn/Br)	2000	baterie	20	20	--
Vanad Redox	3000	baterie	10	10	--
Sodíko - sírové (NaS)	1500	článek	170	345	250
	1000	baterie	115	170	240
Li-C/LiCoO ₂	600	článek	155	410	--
Li-C/LiNi _{1-x} Co _x O ₂	400	článek	150	400	--
Li-C/LiMn ₂ O ₄ (polymerní elektrolyt)	600	článek	140	300	--
Li/MnO ₂ (tekutý elektrolyt)	300	článek	120	265	--

tab. 3-2 Porovnání baterií

Technologie	Aplikace	Výhody/nevýhody
Olověno - kyselinové	Elektrické/hybridní automobily, malé zásobníky pro domácnosti	Komerčně dostupné, bezúdržbové /nízká specifická energie
Nikl - kadmiové	Elektrické/hybridní automobily, vesmírné aplikace, domácnosti	Komerčně dostupné /relativně vyšší cena, nízká energie
Nikl - metalhydrid	Elektrické/hybridní automobily, Elektrické/hybridní automobily,	Vysoká specifická energie /relativně drahé
Nikl - železo	Průmyslové	Komerčně dostupné /velká údržba, možnost tvorby vodíku
Nikl - vodík	Armáda, vesmírné tech.	Dlouhá životnost /velice drahé, vysoké samovybití
Zinek/oxid stříbra	Armáda, vesmírné tech.	Vysoká specifická energie a výkon /vysoká cena, velice krátká životnost
Zinek/bromid	--	Nízká cena /nízká energetická hustota
Zinek vzduch	Průmyslové	Specifická energie /krátká životnost, nízký specifický výkon
Regenesys (PSB, Zn/Br)	Energetický zásobník	Velice velká velikost
Vanad Redox	Energetický zásobník	Velice velká velikost
Sodíko - sírové (NaS)	Energetický zásobník	Vysoká specifická energie a energetická hustota /vysoká teplota
	--	Vysoká specifická energie a energetická hustota /vysoká teplota
Li-C/LiCoO ₂	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie /cena
Li-C/LiNi _{1-x} Co _x O ₂	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie
Li-C/LiMn ₂ O ₄ (polymerní elektrolyt)	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie /vyšší cena
Li/MnO ₂ (tekutý elektrolyt)	Domácnosti	Vysoká specifická energie /nutný další vývoj

tab. 3-3 Porovnání baterií

Technologie	Napětí naprázdno [V]	Napětí v uzavřeném obvodu [V]	Teoretická specifická energie [Ah.kg ⁻¹]	Teoretická specifická energie [Wh.kg ⁻¹]	Rozsah teplot [°C]	Doba znovunabití [h]	Samovybíjení při 20°C [%/měsíc]
Olověno - kyselinové	2,1	1,98	120	252	-20 - +50	8-24	3
Nikl - kadmiové	1,35	1,2	181	244	-40 - +60	1-16	10
Nikl - metalhydrid	1,35	1,2	178	240	-30 - +65	1-2	30
Nikl - železo	1,4	1,2	224	314	-10 - +60	5	25
Nikl - vodík	1,5	1,2	178	240	-10 - +30	1-24	60
Nikl - zinek	1,73	1,6	215	372	-20 - +50	8	15
Zinek/oxid stříbra	1,85	1,55	283	524	-20 - +60	8-18	5
Zinek/bromid	1,83	1,6	238	429	+10 - +50	--	12-15
Zinec/vzduch	1,6	1,1	825	1320	0 - +45	--	--
Hliník/vzduch	2,73	1,4	2980	8135	+10 - +60	--	--
Železo/vzduch	1,3	1	960	1250	-20 - +45	--	15
Zinek/vzduch	1,6	1,1	825	1320	0 - +40	--	--
Regenesys (PSB, Zn/Br)	1,5	1,2	27	41	+10 - +50	8-12	5-10
Vanad Redox	1,4	1,25	21	29	+10 - +50	6-10	5-10
Sodíko - sírové (NaS)	2,08	2	375	755	+300 - +350	5-6	--
Sodík/niklchlorid	2,58	2,47	305	787	+250 - +350	3-6	--
Li-C/LiCoO ₂	3-4	3-4	100	360	-20 - +60	--	--
Li-C/LiNi _{1-x} Co _x O ₂	3-5	3-4	--	--	-20 - +45	2,5	<3,5
Li-C/LiMn ₂ O ₄ (polymerní elektrolyt)	3-6	3-4	105	400	-20 - +60	3	<2,5

tab. 3-4 Porovnání baterií

4 Metody dimenzování akumulátorových baterií

Dimenzování systému FV-baterie spočívá ve volbě velikosti PV (z hlediska plochy) a skladování (kapacity baterie). Dopadající sluneční záření má náhodnou složku, která znemožňuje přesně vědět, kolik energie systém získá v průběhu daného období, takže před vytvořením samostatného fotovoltaického systému je třeba vypočítat velikost panelu a kapacitu baterie. Kapacita FV může být definována jako poměr mezi průměrnou výrobou energie a průměrným zatížením (energetickou poptávkou). Skladovací kapacita může být vyjádřena v rozsahu období autonomie (rozdělení kapacity baterie podle požadavku zatížení). Existuje několik takových metod a užití jedné nebo druhé, bude záviset na počátečních dostupných údajích. Metody dimenzování se obvykle dělí do tří kategorií: založené na zkušenostech projektanta (intuitivní nebo empirické), analytické metody a simulační metody. [16] [17]

Obecný vzorec pro výpočet kapacity akumulátoru. [30]

$$Q = \frac{U_p \cdot t}{R} \text{ [A·h; V, h, } \Omega \text{]} \quad (1)$$

U_p	průměrné napětí akumulátoru
Q	kapacita akumulátoru
t	čas po který vybíjení probíhalo
R	zátěžový rezistor

4.1 Intuitivní metody

Tento zjednodušený výpočet velikosti systému se provádí bez případného vztahu mezi různými subsystemy a bez ohledu na náhodný charakter slunečního záření. Jedním z nejčastěji používaných postupů je metoda „nejhoršího měsíce“. Měsíční energetická bilance se počítá s parametry příkonu v měsíci, který má nejhorší podmínky pro systém. Výsledkem této metody je, že pokud funguje pro tento měsíc, bude pracovat po zbytek roku. To obvykle vede k předimenzování a brání jakékoliv energetické nebo ekonomické optimalizaci. [17]

4.2 Analytické metody

Jsou to metody založené na pravděpodobnosti a metody založené na zkušenostních koeficientech.

Jejich největší výhodou je, že výpočet velikosti různých subsystemů je velmi jednoduchý. Nevýhodou těchto metod je, že buď nejsou dostatečně přesné, nebo se vyžaduje stanovení koeficientů pro výrazy pro každou lokalitu zvlášť. Rovněž je obtížná aplikace na místech, pro které nemáme denní sérii záření. [16]

Dle [17] se v roce 1984 objevila přibližná metoda ke studiu výkonu samostatných fotovoltaických systémů na základě postupu, který zachází s energií zachycování, ukládání a čerpání energie jako náhodného průběhu. Této roku byl vyvinut analytický postup pro stanovení optimální velikosti samostatné FV elektrárny. V následujících letech se metoda neustále obměňovala a zdokonalovala. Byla rozšířena například s ohledem na úroveň skladování, nebo byla navržena korelace spojující normalizovanou kapacitu panelu na velikosti úložiště.

Příklady metod výpočtů:

$$\text{➤ } C = \frac{C_{bn} \cdot DOD}{L} \quad (2)$$

L denní průměrná spotřeba energie nebo zatížení (W·h / den)

C_{bn} jmenovitá kapacita baterie (W·h)

DOD přípustná hloubka vybití baterie

C kapacita baterie představující počet dní, během nichž jsou baterie schopny dodávat požadovanou energii aniž by čerpaly energii z FV pole [25]

$$\text{➤ } C_U = DOD \cdot n_c \cdot U \cdot I \cdot 3600 \quad (3)$$

$$C_{Sj} = \frac{C_{Uj}}{L_j} \quad (4)$$

j index měsíčních hodnot

L denní zatížení (kW·h)

C_U užitečná skladovací kapacita baterie (J)

DOD přípustná hloubka vybití baterie

n_c počet článků akumulátoru

U napětí akumulátoru (V)

I proud akumulátoru (A·h) [26]

$$\text{➤ } C = \frac{E_{C,daily} \cdot AF}{\eta_{Bat,Inv} \cdot DOD \cdot V_{Bat}} \quad (5)$$

AF faktor autonomie (počet dní dodávek energie z baterie)

DOD přípustná hloubka vybití baterie

V_{Bat} napětí baterie

$\eta_{Bat,Inv}$ obousměrná účinnost baterií

$E_{C,daily}$ denně spotřebovaná energie [27]

$$\triangleright n_{Bat} = \frac{E_{max}^{day}}{C_{Bat} \cdot DOD \cdot V_{Bat}} \quad (6)$$

$$E^{day} = \sum_{t=8}^{18} (P_{Panel}(t) - P_{Load}(t)) \quad (7)$$

P_{Panel} celkový hodinový výkon (kW)

E^{day} celkový přebytek energie v průběhu dne (kW)

C_{Bat} kapacita jedné baterie (A·h)

DOD přípustná hloubka vybití baterie

V_{Bat} stejnosměrné napětí baterie

n_{Bat} počet baterií skladování

E_{max}^{day} maximální denní přebytek energie [29]

$$\triangleright C_{Ah} = \frac{C_B L}{\eta_{c-d} DOD \cdot V} \text{ [A·h]} \quad (8)$$

η_{c-d} účinnost nabíjení / vybíjení baterie

DOD přípustná hloubka vybití baterie

V jmenovité napětí baterie

C_B počet dní autonomie

L zátěž (Wh) [17]

$$\triangleright B = \frac{\max\{Q_B(t)\}}{DOD} \quad (9)$$

$$Q_B(t) = Q_B(t - \Delta t) + \int_{t-\Delta t}^t (P(t) - D(t)) f dt \quad (10)$$

$$f = \eta_c \text{ pro } P \geq D$$

$$f = \frac{1}{\eta_d} \text{ pro } P < D$$

$Q_B(t)$ uložená energie v každém okamžiku t

P příkon ze zdroje

D výkonový požadavek

B odpovídající velikost baterie

DOD přípustná hloubka vybití baterie

η_c účinnost nabíjení

η_d účinnost vybíjení [16]

4.3 Numerické metody

V metodách založených na simulaci je pravděpodobnost ztráty zatížení vypočtena pomocí podrobné simulace chování systému, po formulaci matematických modelů pro jednotlivé komponenty. Simulační modely, ačkoli jsou datově náročné, umožňují podrobné modelování systému a pomáhají ve snímání každodenních a sezónních odchylek v zátěži a zdroji. Pro každé časové posuzované období, obvykle den nebo hodinu, se vypočítá energetická bilance systému a zatěžovací stav baterie. Spolehlivost systému je definována jako vyjádření části výkonu, která je dlouhodobě hrazena z FV zdroje. Tyto metody umožňují optimalizaci výkonu a ekonomických nákladů na systém. Jednou z běžně používaných metod je pravděpodobnost ztráty zatížení (LOLP). Tento parametr je obrácený vztah ke spolehlivosti systému. Nevýhodou těchto metod je, že je třeba mít k dispozici hodinové nebo denní série slunečního záření po dostatečně dlouhou dobu.

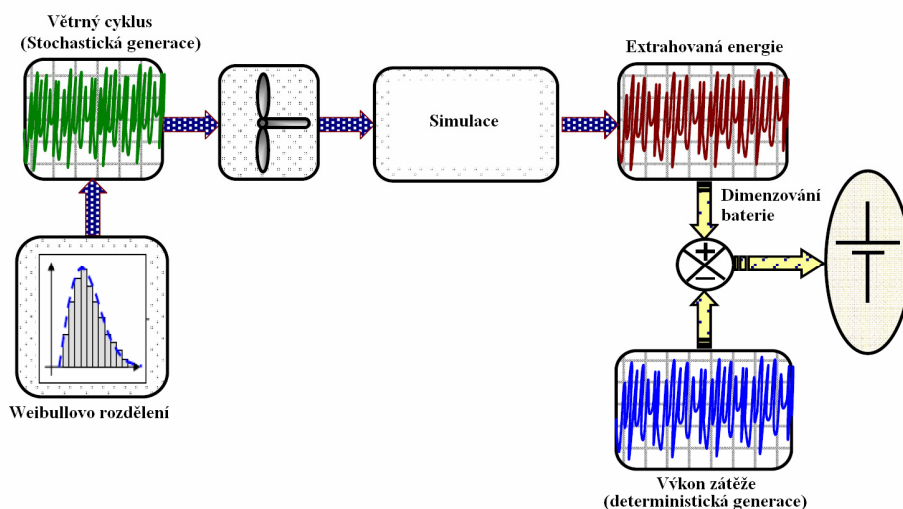
Patří zde nové metody, jako jsou umělé neuronové sítě. Neuronová síť je jeden z výpočetních modelů používaných v umělé inteligenci. Je to struktura určená pro distribuované paralelní zpracování dat. [16] [17]

Příklady metod výpočtů:

$$\text{➤ } E_{BT} = C \cdot V_0 \quad (11)$$

V_0 jmenovité napětí

C jmenovitá kapacita [18]



obr. 4-1 Postup dimenzování baterií

- Elektromotorická síla baterie

$$E_b = 0,01375(SOC) + 11,5 \quad (12)$$

Stav nabití (SOC), je definován jako zbývajících nabití baterie v porovnání s kapacitou baterie v rozsahu od 0 do 100.

$$SOC = SOC_0 - \left(\frac{1}{C_n} \int_0^t I_b d\tau \right) \cdot 100 \quad (13)$$

C_n kapacita baterie

I_b protékající elektrický proud [19]

$$➤ C^i(t) = C^i(t-1) + n_B \frac{P_B^i(t)}{V_{BUS}} \Delta t \quad (14)$$

$$C^i(24) = C^{i+1}(0) \quad (15)$$

$C^i(t)$, $C^i(t-1)$ dostupná kapacita baterie (A·h) na hodinu t a $t-1$, respektive den i

n_B účinnost baterie při nabíjení 80% a 100% při vybíjení

V_{BUS} napětí stejnosměrné sběrnice (V)

$P_B^i(t)$ vstupní / výstupní výkon baterie (W), $P_B^i(t) < 0$ během vybíjení, $P_B^i(t) > 0$ během nabíjení

Δt časový krok simulace [20]

$$➤ C_1(t) = \eta_{charge} \int_{\Delta t_1} [P_p(t) + P_{charger}(t) - P_c(t)] dt \quad (16)$$

$$C_2(t) = \frac{1}{\eta_{discharge}} \int_{\Delta t_2} [P_p(t) + P_{charger}(t) - P_c(t)] dt \quad (17)$$

$P_{charger}(t)$ výstupní výkon nabíječky

$P_p(t)$ výstupní výkon FV

$P_c(t)$ výkon zátěže

$C_1(t)$ přínos energie během doby nabíjení Δt_1

$C_2(t)$ ztráta energie během doby vybíjení Δt_2 [22]

$$\text{➤ } C(I, \theta) = \frac{K_c C_0 \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f}\right)^\varepsilon}{[1 + (K_c - 1)(I / I^*)^\delta]} \quad (18)$$

C_0	jmenovitá kapacita baterie při 0°C
ε	empirický koeficient
θ_f	bod tuhnutí, který je obvykle zvolen -40°C
θ	teplota elektrolytu
K_c	empirický koeficient
δ	empirický koeficient
I	pevný vybíjecí proud
I^*	referenční proud [23]

$$\text{➤ } Q_B(t+1) = Q_B(t)(1 - D_s) + K(V_B I_B - R_0 I_B^2) \quad (19)$$

D_s	samovolné vybíjení
K	účinnost baterie při nabíjení / vybíjení [24]

$$\text{➤ } P_{Batt} = P_{OUT_PV} - P_{LOAD} \quad (20)$$

$$P_{OUT_PV} = \frac{-1 + \left(\sqrt{1 - 4a(P_0 - P_M)}\right)}{2a} \quad (21)$$

P_M	bod maximálního výkonu
P_{LOAD}	výkon zátěže
P_0	ztráty
a	kvadratický člen [28]

5 Vyhodnocení metod dimenzování akumulátorových baterií

Nejvhodnějším typem početní techniky z pohledu dimenzování akumulátorů, respektive celých ostrovních systémů založených na obnovitelných zdrojích energie, se jeví numerická metoda. V současnosti, kdy je výpočetní technika zcela běžně dostupná, není již nejmenší problém ve zpracovávání velkých objemů dat, které jsou potřeba k numerickým simulacím různých podsystémů. Numerické metody jsou obecně vzato mnohem přesnější, čímž se šetří finance, či životní prostředí. Takováto metoda „šitá na míru“ je oproti modelu analytické metody mnohem sofistikovanější, jelikož se systém využívá v plném rozsahu bez obrovských rezerv. Analytické, popřípadě intuitivní postupy se využívají pro jejich nenáročnost výpočtů. Jsou však také využívány právě kvůli jejich předimenzovaným subsystémům i za cenu vyšších nákladů, protože jejich chod je zkrátka spolehlivější.

Neuronové sítě (systémy umělé inteligence) mají tu výhodu, že nemusíme předem definovat pravidla, kterými se neuronová síť řídí. Pravidla řešení se stanovují až během učení. Nevýhodou jsou velké nároky na uživatele jak v přípravě dat tak i v trénování.

Jako nejlepší ze zmiňovaných metod považuji postup (2). Tato nová analytická metoda byla vyvinuta pro stanovení optimálního dimenzování samostatného fotovoltaického systému, založeného na spolehlivosti a nákladech s použitím měsíčních průměrných denních dat slunečního záření a dalších meteorologických parametrů. Vzniklý model zahrnuje také spotřebu energie pro výpočet požadovaných optimálních parametrů. Ostatní metody jsou v porovnání s touto často poměrně podobné nebo vedou k předimenzování systému.

Závěr

V mé bakalářské práci jsem se věnoval různým používaným vědeckým postupům vhodným k dimenzování baterií pro ostrovní provoz. Zprvu jsem se věnoval ostrovnímu systému jako celku. Při studiu zdrojů pro samostatné sítě jsem zjistil, že mezi nejčastěji používané zdroje patří fotovoltaické články, větrné elektrárny a dieselaagregáty. Obvykle se navíc používá jejich kombinace, kdy nejoblíbenější sestavou je fotovoltaický panel spojený s větrnou elektrárnou. Takovýto celek se už nazývá jako hybridní. Pro svou „zelenou“ energii jsou fotovoltaické články a větrné turbíny upřednostňovány v západním světě, kdežto v průmyslu a rozvojových zemích se z důvodu jejich astronomických pořizovacích nákladů a nízké návratnosti, stále využívá k výrobě elektrické energie spalování fosilních paliv.

V druhé řadě jsem se zabýval rozdělením a různými zástupci jednotlivých druhů akumulčních systémů. Protože se u samostatných systémů nejčastěji bavíme o elektrické energii, zaměřil jsem se tedy na hromadění elektřiny, a to v jakékoli formě. Ukládání elektrické energie v rámci samostatného režimu sítě je zásadní pro vyvážení přebytku a naopak nadbytku výkonu v celém systému. Po prostudování látky bylo zřejmé, že pro vhodné uchovávání energie se však hodí jen určité typy. Bylo třeba zohlednit mnoho aspektů, jako například požadovaný výkon, velikost akumulčního systému, či formu ukládání energie. Jedná se pouze o zlomek výčtu hledisek výběru, což je dáno použitím ostrovního režimu v praxi. Některé z méně známých metod ukládání energie vypadají velice zajímavě a pro použití lákavé, přesto je nelze v ostrovním systému zužítovat a je třeba jejich dalšího zkoumání a vylepšování. Zdroje pracující do ostrovní sítě se obvykle nacházejí v málo obydlených místech planety a dosahují mnohem nižších výkonů v porovnání s konvenčními elektrárnami. Z toho je zřejmé, že využití kupříkladu přečerpávací elektrárny, by nebylo z ekonomického hlediska, nejvhodnějším východiskem řešení denní nestability sítě rodinného domu.

Nejvhodnějšími zásobníky energie v dnešní době a nejspíše v blízké budoucnosti, se jeví ukládání pomocí elektrochemické přeměny. Do této kategorie patří průtokové baterie, palivové články a akumulátory, jenž úspěšně pracují již několik desetiletí. Jejich obliba je dána především nízkými nároky na údržbu, jednoduchostí aplikace pro spotřebitele a dobrým začleněním do stavby. Existuje nepřehledné množství druhů akumulátorových baterií, avšak k uplatnění je třeba důkladné technicko ekonomické zhodnocení problematiky, z důvodu značných rozdílů v pořizovacích nákladech těchto technologií.

Mezi perspektivní bych vybral průtokové baterie pro jejich relativně nižší cenu a obrovské množství cyklů. Z tradičnějších typů bych vyzdvihl lithiové baterie, kvůli jejich vynikajícím parametrům a neustálému rozvoji i za cenu vyšších nákladů. Přesto nesmím opomenout klasické

olověné akumulátory, které se od doby svého vzniku, přes své některé nevýhody, staly vlastně celosvětovým standardem a uživatelé je upřednostňují nejen pro jejich cenu.

V poslední kapitole jsem měl za úkol se věnovat metodám dimenzování akumulátorových baterií. V takovém návrhu jde především o to, aby celý systém spolehlivě fungoval i za nevhodných klimatických podmínek, nebo při vyšším odběru výkonu. Právě tyto obzvlášť proměnlivé neznámé, dělají z dimenzování baterií, respektive celého ostrovního systému, nadmíru složitou početní operaci. Touto problematikou se již zabýval velký počet akademiků, zhruba od osmdesátých let minulého století a zanechali po sobě značný kus práce. Při prvních debatách o výpočtech ostrovních systémů se využívalo intuitivních metod. Jak z názvu vyplývá, jde o jednoduchou techniku založenou na tušených pochodech celku. Z této metody postupem času vznikly promyšlenější analytické a numerické metody.

Z pohledu dalšího vývoje, jde zcela určitě o důležitou a perspektivní součást elektroenergetiky. Je zde však stejně jako v jiných vědních oborech, stále prostor ke zdokonalování a hledání levnějších alternativ. Finanční stránka věci je nejsilnější brzdou rozvoje alternativních zdrojů energie a tedy i ostrovních celků. Jelikož však žijeme ve střední Evropě a máme zde velice rozvinutou elektrickou síť, není v naší oblasti třeba uvažovat o budování většího množství ostrovních systémů.

Literatura

- [1] *Catalogo Boray* [online]. c2012, [cit. 2013-01-4]. Dostupné z <<http://www.bornay.com/userfiles/descargas/catalogobornaycomercial.pdf>>
- [2] ČEPS, a.s. - *Schopnost ostrovního provozu* [online]. c2011 [cit. 2012-11-28]. Dostupné z <<http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Podpurne-sluzby/KategoriePpS/Stranky/OP.aspx>>
- [3] *Fotovoltaická zařízení - Ministerstvo životního prostředí* [online]. c2009, [cit. 2013-01-5]. Dostupné z <http://www.mzp.cz/cz/fotovoltaicka_zarizeni>
- [4] LUŤCHA, Josef, Ing., CSc. Časopis Stavebnictví. *Hybridní soustava větrné elektrárny a solárních fotovoltaických článků* [online]. c2009, 01/09 [cit. 2012-12-28]. Dostupné z <http://www.casopisstavebnictvi.cz/hybridni-soustava-vetrne-elektrarny-a-solarnich-fotovoltaickych-clanku_A1906_I01_09>
- [5] MIŠÁK, Stanislav - PROKOP, Lukáš. *Off-grid Power Systems* [online]. c2010, [cit. 2012-12-15]. Dostupné z <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5490003&tag=1>>
- [6] Christoph Gatzen. *The Economics of Power Storage*. Mnichov: Oldenbourg Industrieverlag, c2008. 254s. ISBN 978-3-8356-3138-0
- [7] *Electricity Storage - Technology Comparison* [online]. c2009, [cit. 2013-02-5]. Dostupné z <http://www.electricitystorage.org/technology/storage_technologies/technology_comparison>
- [8] REIS, G. - NEUMULLER, H. – W. *Comparison of Energy Storage in flywheels and SMES*. C357-360. Erlangen: Physica, 2001, 1306 – 1311
- [9] RADIL, Lukas – BARTOSIK, Tomas – MASTNY, Petr. *Problems of wind power plants from point of view of grid* [online]. [cit. 2013-1-11]. Dostupné z <<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/lalaguna/EPREWA/EPREWA58.pdf>>. ISBN: 978-960-474-093-2. ISSN: 1790-5095
- [10] THELEN, R. F. – GATTOZZI, A. – WARDELL, D. – WILLIAMS, A. *A 2-MW Motor And ARCP Drive for High-Speed* [online]. 2007 [cit. 2013-1-8]. Dostupné z <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4195949&tag=1>. ISBN: 1-4244-0713-3
- [11] ZHONG, Yun – ZHANG, Jiancheng – LIU, Aiguo – LI, Gengyin. *Research on Energy Efficiency of Supercapacitor Energy Storage System* [online]. Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on [cit. 2013-2-8]. Dostupné z <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4115877&tag=1>. ISBN: 1-4244-0110-0
- [12] REMY, Heinrich, Dr. *Anorganická chemie -I.díl*. Vydání dvanácté. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1961. 936s. L16-B3-I- 01/61826-I
- [13] KRBAL, Michal. *Výroba elektrické energie větrnými elektrárnami a možnosti její akumulace*. Brno, 2007. 80 s. Bakalářská práce na fakultě Elektrotechniky a

- komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně na Ústavu elektroenergetiky. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Drápela, Ph.D. Dostupné z <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=9501>
- [14] MASTNÝ, Petr, doc., Ing., Ph.D – DRÁPELA, Jiří, doc., Ing., Ph.D – MIŠÁK, Stanislav doc., Ing., Ph.D – MACHÁČEK, Jan, Ing., Ph.D – PTÁČEK, Michal, Ing. – RADIL, Lukáš, Ing. – BARTOŠÍK, Tomáš, Ing. – PAVELKA, Tomáš, Ing. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vydání první. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. Počet stran 256. ISBN 978-80-01-04937-2
- [15] *Normalizované TDD — OTE, a.s.* [online]. c2013, [cit. 2013-3-22]. Dostupné z <<https://www.ote-cr.cz/statistika/typove-diagramy-dodavek-elektřiny/normalizovane-tdd>>
- [16] ARUN, P. – BANERJEE, Rangan – BANDYOPADHYAY, Santanu. *Sizing curve for design of isolated power systems* [online]. c2006, [cit. 2013-4-1]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [17] SIDRACH-de-CARDONA, M. – MORA LÓPEZ, L. *A simple model for sizing stand alone photovoltaic systems* [online]. c1998, [cit. 2013-4-3]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [18] BELOUDA, Malek – BELHADJ, Jamel – SARENI, Bruno – ROBOAM, Xavier. *Battery sizing for a stand alone passive wind system using statistical techniques* [online]. c2011, [cit. 2013-4-11]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [19] PRAPASSORNPIITAYA, Anchalee – AUDOMVONGSEREE, Kulyos. *Determining Optimal Battery Capacity of Wind Generator with Power Fluctuation Consideration* [online]. c2011, [cit. 2013-4-9]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [20] KOTROULIS, Eftichios – KOLOTOTSA, Dionissia – POTIRAKIS, Antonis – KALAITZAKIS, Kostas. *Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms* [online]. c2005, [cit. 2013-4-8]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [21] BOROWY S., Bogdan – SALAMEH M., Ziyad. *Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System* [online]. c1996, [cit. 2013-4-7]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [22] MUSELLI, M. – NOTTON, G. – POGGI, P. – LOUCHE, A. *PV-hybrid power systems sizing incorporating battery storage: an analysis via simulation calculations* [online]. c1999, [cit. 2013-4-2]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [23] CERAULO, Massimo. *New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries* [online]. 2000, [cit. 2013-3-26]. Dostupné z <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=898088&tag=1>
- [24] CHEN, Hung-Cheng. *Optimum capacity determination of stand-alone hybrid generation system considering cost and reliability* [online]. c2012, [cit. 2013-4-2]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [25] JAKHRANI, Abdul Qayoom – OTHMAN, Al-Khalid – RAGAI, Andrew – RIGIT, Henry – SAMO, Saleem Raza – KAMBOH, Shakeel Ahmed. *A novel analytical model*

- for optimal sizing of standalone photovoltaic systems* [online]. c2012, [cit. 2013-3-16]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [26] POSADILLO, R. – LUQUE, R. López. *A sizing method for stand-alone PV installations with variable demand* [online]. c2007, [cit. 2013-4-5]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [27] IBRAHIM, Ibrahim, Dr. *Straight forward technique for sizing stand – alone PV hybrid systems* [online]. c2005, [cit. 2013-4-22]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [28] SPERTINO, Filippo – DI LEO, Paolo – COCINA, Valeria – TINA, Giuseppe M. *Storage sizing procedure and experimental verification of stand-alone photovoltaic systems* [online]. c2012, [cit. 2013-4-1]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [29] REZK, Hegazy – EL-SAYED, Abou Hashema M. *Sizing of a stand alone concentrated photovoltaic system in Egyptian site* [online]. 2012, [cit. 2013-4-7]. Dostupné z <<http://www.scopus.com>>
- [30] LUST, Radek. *Měření kapacity akumulátorů*. Brno, 2010. 44 s. Bakalářská práce na fakultě Elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně na Ústavu radioelektroniky. Vedoucí bakalářské práce prof. Dr. Ing. KOLKA, Zdeněk. Dostupné z <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29596>